

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.031

基于超效率 DEA 模型的中国粮食生产用水效率评价

谭忠昕 郭翔宇

(东北农业大学经济管理学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为全面评价中国粮食生产用水效率,发现粮食生产用水过程中投入要素存在的问题,构建了中国粮食生产用水效率评价指标体系,基于超效率 DEA 模型,分析了 2009—2014 年中国 31 个省级行政区的粮食生产用水效率的时空变化特征,阐明了中国粮食生产用水投入要素的调整方向和调整程度。结果表明:中国 4 个经济区的粮食生产用水效率差异显著,东北地区粮食生产用水效率最高,且波动较小;中部地区和西部地区粮食生产用水效率较低,且波动较大;东部地区粮食生产用水效率最低,且处于下降趋势。不同省级行政区之间的粮食生产用水效率差异较大,粮食生产用水投入要素配置不合理;粮食生产灌溉用水和粮食生产有效降水均存在投入冗余和投入不足现象,说明两者未能实现相互促进和相互调节。

关键词: 粮食生产用水;用水效率;超效率 DEA;投影分析

中图分类号: S27; F326.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)08-0280-09

Evaluation and Analysis of Chinese Grain Production Water Use Efficiency Based on Super-efficiency DEA Model

TAN Zhongxin GUO Xiangyu

(College of Economics and Management, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Water resource is one of the most important input factors in agricultural production. Despite the relative abundance of water resources, China is still considered as a water stressed country with approximately 2 100 m³ per capita per year. Aiming to construct the evaluation index system to comprehensively evaluate the water use efficiency and find out the problems concerning water as production input factors during the water usage process in China's grain production. The super-efficiency DEA method was applied to evaluate the water use efficiency within China's grain production sector from 2009 to 2014, and to find out the proper adjustment direction and adjustment level. Eventually the countermeasures and suggestions for improving grain production's water use efficiency in China were put forward. The results showed that there were substantial differences in grain production's water use efficiency among China's four major economic zones. The northeast region had performed the highest efficiency level and possessed slightly fluctuate trend simultaneously, while the central and western regions revealed the lower efficiency level and greatly fluctuate trend. Last but not the least, the eastern region with the lowest efficiency level characteristic experienced the declining trait. In addition, there were significant differences in grain production's water use efficiency among different provinces which was attributed to unreasonable water input allocation within the grain production's sector; the serious problem of co-existence of water input redundancy and inadequacy phenomena, which precisely reflected the failure in mutual promotion between irrigation system and effective precipitation in China's grain production sector.

Key words: water for grain production; water use efficiency; super-efficiency DEA; projection analysis

收稿日期: 2019-03-10 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家软科学研究计划重大合作项目(2014GXSD016)和文化名家暨“四个一批”人才工程项目

作者简介: 谭忠昕(1990—),女,博士生,主要从事粮食生产用水与虚拟水贸易研究,E-mail: tantanbei1030@163.com

通信作者: 郭翔宇(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事农业经济理论与政策研究,E-mail: guoxy@neau.edu.cn

0 引言

水资源是农业发展的基础资源,在我国农业生产中处于战略地位,水资源的可持续利用是农业可持续发展的基础和前提之一^[1]。作为人口大国,粮食是关乎国计民生和国家安全的战略性特殊商品,保障国家粮食安全是发展现代农业的首要任务。粮食是需水量最大的农产品,然而随着经济社会的不断发展,大量农业用水转化为非农用水,农业用水日益紧张,灌溉用水更是受到严重影响。我国灌溉农田约占耕地总面积的50%,灌溉水消耗了全国用水量的60%以上^[2]。在粮食生产面临水资源有限、粮食需求不断扩大的情况下,深入研究粮食生产用水效率、优化粮食生产用水投入要素配置具有重要的现实意义。

针对粮食生产用水效率的评价,以往在研究内容上多侧重于对灌溉用水(蓝水)^[3]的讨论,在研究方法上多采用水分生产率^[4]、模糊物元模型^[5]、熵值法和层次分析法^[6]等,以实现节水潜力计算^[7]的评价和分析。以往研究主要是对不同评价区某单一产出指标的比较,对不同评价区多种投入和产出指标的综合效率的比较相对较少。虽然也有学者采用DEA方法^[8]、SFA方法^[9]等多种方法对用水效率进行评价,但大多是对个别地区或灌区的农业整体的用水效率进行评价,对中国31个省级行政区的粮食生产用水效率评价相对较少。还有学者从虚拟水流动^[10]和作物用水效率与产量的关系^[11]角度对粮食生产用水效率进行研究。

与以往的研究方法相比,超效率DEA模型不需要确定指标函数模型,有效避免了主观因素对模型构建的影响,且能排列有效决策单元和非有效决策单元的效率大小。超效率DEA模型还可以同时比较多个有效主体的粮食生产用水效率,并能有效克服环境因素对效率的影响。相较于传统DEA模型无法进一步评价出现多个效率同时为1的情况,超效率DEA模型可以进一步评价各用水主体间粮食生产用水效率的相对有效性。

在以往研究成果基础上,本文选择超效率DEA模型对中国粮食生产用水效率进行评价分析。在选取粮食生产直接投入要素的基础上,将粮食生产用水作为单独的投入指标,并借鉴广义农业水资源概念,将粮食生产用水划分为粮食灌溉用水(蓝水)和有效降水(绿水)两项投入指标,构建中国粮食生产用水效率评价指标体系。进而根据超效率DEA结果,详细分析中国粮食生产用水效率的时间变化趋势和空间差异。在投影分析基础上,对粮食生产用

水投入要素的投入冗余和不足情况进行分析,明确投入要素的调整方向和调整程度。以期为提高中国粮食生产用水效率提供理论依据,为缓解粮食生产过程中的水资源供需矛盾提供思路与方法,保障国家粮食产业的可持续发展和转型升级。

1 研究方法 with 数据处理

1.1 超效率DEA模型

数据包络分析(Data envelopment analysis, DEA)方法是一种非参数估计方法,其主要思想是通过在生产前沿面上的投影分析,探究非DEA有效单元投入和产出不匹配的原因以及改进方向,进而调整资源投入量和效益产出量,使决策单元的投入和产出效率达到最大化。DEA方法可以评价拥有多个输入和输出变量的不同决策单元(Decision making unit, DMU)间的相对效率,其优点在于针对多项投入和产出指标,不需要假设具体的生产函数形式。

DEA方法的演进可分为3个阶段。第1阶段是传统的CCR模型和BCC模型研究阶段,没有考虑期望产出与非期望产出之分。第2阶段是对传统DEA模型中非期望产出问题提出解决办法^[12]:①投入产出转置法。②正向属性转换法。③方向性距离函数法。目前,这3种办法均有使用,但是前两种方法会导致效率偏移或无效率,第3种方法使用最广,缺点是没有考虑到松弛变量问题^[13]。第3阶段是在前两个阶段的基础上,ANDERSEN等^[14]提出了超效率DEA模型,有效解决了松弛变量问题。超效率DEA模型突破了传统DEA方法存在多个DMU效率为1,无法进一步比较分析效率高低的限制,可以对所有决策单元(DMU)效率重新排序进行比较。

如图1所示,假设有A、B、C、D、E共5个决策单元,其中A、B、C、D 4个决策单元均为DEA有效,它们所构成的效率前沿边界为折线ABCD, C点处在有效生产前沿面,其DMU的效率为1; E点被效率前沿边界ABCD所包络,其DMU的效率小于1,所以E点是无效率的^[15]。

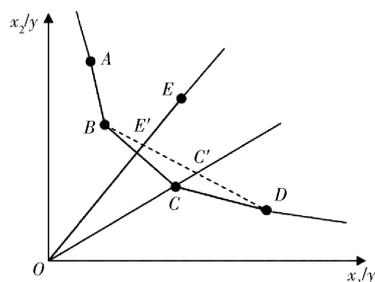


图1 超效率DEA模型

Fig. 1 Super efficiency DEA model

而超效率DEA模型在计算DMU的效率时,C

点被排除在决策单元的参考集合之外,因此生产前沿面就由 $ABCD$ 变为了 ABD ,此时 C 决策单位的超效率 $l_{OC'}/l_{OC} > 1$ ($l_{OC'}$ 、 l_{OC} 为 OC' 和 OC 长度)。而对于原本就是 DEA 无效率的决策单位 E ,在超效率 DEA 模型中其所面临的效率前沿边界仍旧是 $ABCD$,其超效率与在 DEA 模型下得到的效率一致,仍为 $l_{OE'}/l_{OE} < 1$ ($l_{OE'}$ 、 l_{OE} 为 OE' 和 OE 长度)^[16]。

粮食生产用水效率属于投入与产出的效率评价问题,因此,本文选择超效率 DEA 模型来评价中国粮食生产用水效率。设有 n 个同类型决策单元,有 i 个投入变量, j 个产出变量,具体公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \theta \\ \text{s. t.} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_0}}^n \alpha_j x_j + s^- = \theta x_0 \\ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq j_0}}^n \alpha_j y_j - s^+ = y_0 \\ \alpha_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \\ s^+ \geq 0 \\ s^- \geq 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

式中 θ ——综合效率(即本文的粮食生产用水效率),其值越大表示综合效率越高

x_0 ——被评价决策单元的投入变量

y_0 ——被评价决策单元的产出变量

x_j ——第 j 个省级行政区的投入量

y_j ——第 j 个省级行政区的产出量

α_j ——各单位组合系数

s^+ ——松弛变量

s^- ——剩余变量

1.2 评价指标构建与数据选择

生产效率^[17]是评价经济资源使用效率的相对指标,用来度量在固定数量的要素投入下实际生产达到最大产出的程度。粮食生产用水作为投入要素,其效率所度量的是在实际产出和其他投入水平不变的情况下,粮食生产用水的最低使用量与实际使用量的比值。因此,本文将粮食生产用水效率界定为:在粮食生产多要素投入的基础上,达到最优配置效率时,粮食生产用水需求量与粮食生产用水使用量的比值,是粮食产出最大化时粮食生产用水的经济效率。

农业经济学认为粮食生产过程中的直接投入要素包括劳动力、土地和资本3方面,并将粮食生产用水作为单独的投入指标进行评价,从4方面选择指标体系中的投入要素;效率直接体现产出,因此选择粮食产量作为指标体系中的产出要素。遵循这一原则,选取7项投入要素、1项期望产出要素构建粮食

生产用水效率评价指标体系。根据水资源来源的不同,按照广义农业水资源概念,农业用水分为蓝水(灌溉用水)和绿水(有效降水)^[18]。蓝水是降水形成径流后进入河道、湖泊或地下含水层形成的地表水和地下水,即传统的水资源;绿水是降水下渗到非饱和土壤层中用于植物生长,以蒸、散发形式垂向进入大气的不可见水^[2,19]。目前,得到普遍认可和推荐的有效降水的计算方法是美国农业部土壤保持局提出的 USUD-SCS 方法,以旬降水量为步长,计算旬有效降水量。为了保证研究的科学性和数据的准确性,本文的粮食生产绿水量和蓝水量采用2010—2014年《中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告》中的研究成果^[20-24]。粮食生产劳动力代表劳动力投入,有效灌溉面积代表土地投入,粮食生产机械总动力、粮食作物化肥施用量和粮食作物农药使用量代表资本投入。

本文的粮食作物选择小麦、玉米、水稻和豆类,具体数据来自于国家统计局网站公布的主要农作物产品产量中的小麦、玉米、稻谷和豆类产量。粮食生产劳动力、粮食作物有效灌溉面积、粮食生产机械总动力、粮食作物化肥施用量和粮食作物农药使用量选取国家统计局网站公布的第一产业从业人员数、有效灌溉面积、农业机械总动力、化肥施用量和农药使用量作为基础数据,用权重系数进行折算后获取。由于统计数据均是大农业口径指标,因此本文借鉴文献^[25-27]中方法,设置权重指标,将粮食生产要素从大农业投入总量中进行剥离处理。权重系数 a 为农业产值与农林牧渔总产值比值乘以粮食播种面积与农作物播种总面积比值,权重系数 b 为粮食播种面积与农作物播种总面积比值。与以往研究用水效率的文献相比,指标体系的确定主要表现为两个方面的差异:①本文更全面考虑了粮食生产投入要素^[1]。②本文更细致地对无法直接获取的投入要素进行剥离处理,没有选择直接用大农业口径数据替代种植业或粮食数据^[9,28-29]。构建的投入产出指标体系如表1所示。

1.3 评价标准设定

超效率 DEA 模型以1作为综合效率分界^[30],根据超效率 DEA 模型对结果的解释,本文将粮食生产用水效率按 DEA 综合效率分为高和低两个状态,具体评价标准如表2所示。

(1)高状态:在用水效率高状态下,超效率 DEA 分析结果 $\theta \geq 1$,粮食生产用水效率相关投入产出 DEA 决策单元有效,粮食生产用水的投入产出匹配,表明粮食生产用水效率相关指标配置状态优。

表 1 粮食生产用水效率评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for water use efficiency of grain production

类型	变量名称	指标解释
投入变量	粮食生产蓝水量 x_1	中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告 2010—2014 中数据
	粮食生产绿水量 x_2	中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告 2010—2014 中数据
	粮食生产劳动力 x_3	第一产业从业人员数与权重系数 a 的乘积
	粮食作物有效灌溉面积 x_4	有效灌溉面积与权重系数 b 的乘积
	粮食生产机械总动力 x_5	农业机械总动力与权重系数 b 的乘积
	粮食作物化肥施用量 x_6	化肥施用量与权重系数 b 的乘积
	粮食作物农药使用量 x_7	农药使用量与权重系数 b 的乘积
产出变量	粮食产量 y_1	粮食总产量

表 2 粮食生产用水效率评价标准

Tab.2 Evaluation criteria for water use efficiency of grain production

项目	粮食生产用水效率	
	高	低
综合效率 θ	$\theta \geq 1$	$\theta < 1$
DEA 是否有效	是	否

表 3 不同 DMU 粮食生产用水效率综合值

Tab.3 Comprehensive value of water use efficiency of grain production with different DMUs

区域	DMU	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
东部	北京	1.01	0.80	1.02	0.80	0.83	0.60
	天津	0.62	0.76	0.54	0.55	0.59	0.70
	河北	0.80	0.78	0.63	0.81	0.80	0.87
	上海	1.11	1.18	1.10	1.13	1.11	1.10
	江苏	0.75	0.84	0.68	0.81	0.81	0.74
	浙江	0.67	0.59	0.55	0.53	0.50	0.51
	福建	0.59	0.55	0.50	0.52	0.48	0.49
	山东	1.03	1.03	0.82	1.03	1.02	1.02
	广东	0.49	0.48	0.44	0.47	0.42	0.47
中部	海南	0.45	0.43	0.38	0.42	0.38	0.41
	山西	0.62	0.70	0.67	0.82	0.72	1.02
	安徽	0.66	0.64	0.56	0.61	0.55	0.60
	江西	1.03	0.81	1.01	1.00	1.01	1.01
	河南	1.08	1.12	1.09	1.10	1.07	1.09
	湖北	0.80	0.78	0.71	0.72	0.69	0.71
	湖南	1.03	0.83	1.00	1.01	0.76	0.88
	内蒙古	1.08	1.09	1.07	1.03	1.04	1.07
西部	广西	0.60	0.62	0.54	0.59	0.55	0.55
	重庆	1.19	1.18	1.09	1.13	1.12	1.17
	四川	1.01	1.02	0.90	1.00	1.01	1.02
	贵州	1.18	1.14	0.66	1.04	1.03	1.06
	云南	0.63	0.60	0.63	0.66	0.63	0.66
	西藏	1.04	1.03	1.06	1.05	1.03	1.03
	陕西	0.72	1.02	1.04	1.01	1.02	1.02
	甘肃	0.67	0.79	0.49	0.56	0.55	0.61
	青海	0.62	0.68	1.01	1.01	1.01	1.01
	宁夏	1.26	1.25	1.20	1.25	1.27	1.23
	新疆	1.23	1.15	1.16	1.25	1.24	1.38
东北	辽宁	0.75	0.71	0.75	0.75	0.80	0.66
	吉林	1.19	1.17	1.24	1.22	1.27	1.31
	黑龙江	1.05	1.05	1.04	1.04	1.05	1.07

(2)低状态:在用水效率低状态下,超效率 DEA 分析结果 $\theta < 1$,粮食生产用水效率相关投入产出 DEA 决策单元无效,粮食生产用水的投入产出不匹配,各投入指标存在投入冗余或不足情况,表明粮食生产用水效率相关指标配置没有达到最佳。

2 结果与分析

2.1 中国粮食生产用水效率分析

将 2009—2014 年我国 31 个省级行政区的粮食生产用水效率相关投入和产出指标数据代入超效率 DEA 模型,选取规模报酬不变和投入导向,利用 DEA - SolverPro 5.0 软件进行超效率 DEA 处理,结果如表 3 所示。

由表 3 可知,2009—2014 年,我国大部分省级行政区的粮食生产用水效率处于下降趋势,仅有 11 个省级行政区的粮食生产用水效率有所提高,处于上升趋势。从不同省级行政区看,有 9 个省级行政区的粮食生产用水效率在 2009—2014 年大于 1,超效率 DEA 有效,其中有 3 个省级行政区属于粮食主产区,分别是河南省、吉林省和黑龙江省。2009—2014 年,粮食生产用水效率最高的省级行政区是宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区,受气候、地势和地质环境的限制,二者均属于缺水地区。在这些不利因素的影响下,宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区的粮食生产用水效率高,说明二者的粮食生产用水要素配置合理,实现了最小的投入和最大的产出。

为科学反映我国不同区域的社会经济发展状况,我国的经济区域划分为东部、中部、西部和东北

4 个地区。根据本文对粮食生产用水效率概念的界定,将从我国 4 个经济分区进行粮食生产用水效率的评价。

如图 2 所示,2009—2014 年,东北地区的粮食生产用水效率最高,其次是西部地区,中部地区第

3,东部地区最低。从时间变化来看,4个经济分区的粮食生产用水效率平均值波动较大,主要表现为两个阶段,分别是2009—2011年的下降期和2011—2014年的波动期。第1阶段由2009年的0.89下降到2011年的0.86;第2阶段由2011年的0.86上升到2012年的0.89,2013年下降为0.87,2014年又恢复到0.89;说明我国粮食生产用水效率较低且整体用水效率没有提升,不同地区的粮食生产用水效率随着时间变化有所波动,但未出现显著提高。

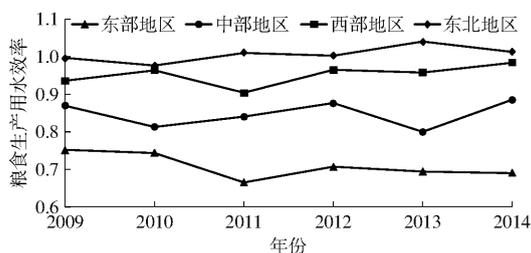


图2 不同地区粮食生产用水效率历年平均值

Fig.2 Average annual water use efficiency of grain production in different regions

东北地区的粮食生产用水效率处于波动增长趋势,波动幅度较小,除2010年综合效率为0.98,未达到超效率DEA有效,其他年份东北地区的粮食生产用水效率均大于1,超效率DEA有效,粮食生产用水效率高。西部地区的粮食生产用水效率先降后升,波动幅度较大,2011年的粮食生产用水效率最低,为0.9,其余年份均大于0.9小于1,超效率DEA无效,粮食生产用水效率低。中部地区的粮食生产用水效率整体处于上升趋势,但2010年和2013年出现较为明显的下降,粮食生产用水效率均大于0.8小于1,超效率DEA无效,粮食生产用水效率低。东部地区的粮食生产用水效率处于波动下降趋势,从2009年的0.75下降到2014年的0.69,超效率DEA无效,粮食生产用水效率低。

整体来看,我国大多数地区的粮食生产用水效率随时间的变化逐步提高,但东部地区则出现较为明显的下降。东部地区是我国经济最发达的地区,相较于第一产业,二三产业发展迅速,工业和生活用水需求量大,这势必对粮食生产用水造成挤压,影响粮食生产用水效率的提高。东北地区是我国主要的商品粮基地,3个省级行政区均属于我国的粮食主产区,承担着保障我国粮食安全的重要责任。在水资源有限的情况下,粮食生产用水效率高对我国粮食生产有着积极的正向影响,粮食生产用水的投入达到了最大化产出,即在粮食生产用水投入一定的情况下,生产出了最多的粮食。

2.2 各省级行政区粮食生产用水效率的优化

前文对我国31个省级行政区2009—2014年间

的粮食生产用水效率进行分析,可以发现我国粮食生产用水效率偏低,说明粮食生产用水要素配置不合理。为了明确粮食生产用水要素的投入冗余或投入不足情况,并寻求合理的解决办法,对我国31个省级行政区的粮食生产用水投入要素进行投影分析,确定粮食生产蓝水和粮食生产绿水的调整程度和调整方向。具体的投影分析结果见表4和表5。根据投影分析的模型解释,可以从调整程度和调整方向来优化要素配置。调整程度可以从两方面来分析:投入量的多少(即调整量);投入量的增减比率(即调整率)。调整方向由正负号表示,正号表示投入不足,说明需要增加投入;负号表示投入冗余,说明需要减少投入。

由表4可知,我国粮食生产蓝水投入存在严重的投入不足和投入冗余问题。其中,辽宁、江苏、浙江、安徽、福建、湖北、广东、广西、海南和云南10个省级行政区,2009—2014年的粮食生产蓝水投入量均存在冗余现象。投入冗余量最多的是广东省,其次是广西壮族自治区,6年平均投入冗余量分别为 $1.45 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $1.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$,平均过度投入80.69%和76.83%的粮食生产蓝水。说明在现有的粮食产量下,广东省和广西壮族自治区的灌溉用水存在严重的浪费情况。应该大力发展节水农业,完善农田灌溉技术,减少灌溉用水的浪费。吉林省和河南省两个省级行政区,2009—2014年的粮食生产蓝水投入量均存在投入不足现象,平均投入不足量为 $3.88 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $4.50 \times 10^9 \text{ m}^3$,粮食生产蓝水平均投入不足41.03%和44.36%。说明在现有的粮食产量下,吉林省和河南省的灌溉用水量不足。应该稳定粮食生产灌溉用水总量,合理制定灌溉定额,降低灌溉用水不足对粮食产量的不利影响。

整体来看,不同省级行政区之间的粮食生产蓝水的投入差异大,投入不足介于0.5%~44.36%,投入冗余介于11.53%~80.69%。灌溉用水的投入冗余或不足,一方面与水资源禀赋的丰沛程度有关;另一方面,也受灌溉设施和灌溉技术的制约。因此,在水资源有限的现实约束下,应提高节水灌溉技术,发展节水农业;合理制定粮食生产用水总量和粮食作物灌溉定额,因地制宜进行粮食灌溉。

由表5可知,我国粮食生产绿水投入存在一定程度的投入不足和投入冗余问题。辽宁、安徽、福建、湖北、广东和云南6个省级行政区,2009—2014年的粮食生产绿水投入量均存在冗余现象。投入冗余量最多的是云南省,其次是安徽省,6年平均投入冗余量分别为 $9.56 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $6.91 \times 10^9 \text{ m}^3$,粮食生产绿水平均过度投入48.42%和24.33%。吉林省

表 4 粮食生产蓝水投影分析

Tab.4 Projection analysis of blue water in grain production

DMU	2009 年		2010 年		2011 年		2012 年		2013 年		2014 年	
	调整量/m ³	调整率/%										
天津	-1.53 × 10 ⁸	-14.84			-3.80 × 10 ⁸	-42.21	-3.59 × 10 ⁸	-41.73	-3.02 × 10 ⁸	-35.58		
河北					-1.28 × 10 ⁹	-11.65						
山西	-7.31 × 10 ⁸	-22.62							-6.22 × 10 ⁸	-17.15		
内蒙古							9.00 × 10 ⁷	0.76				
辽宁	-2.64 × 10 ⁹	-31.41	-2.36 × 10 ⁹	-28.89	-1.81 × 10 ⁹	-22.75	-2.86 × 10 ⁹	-31.80	-2.37 × 10 ⁹	-28.61	-3.37 × 10 ⁹	-42.72
吉林	1.43 × 10 ⁹	15.56	2.84 × 10 ⁹	30.27	4.98 × 10 ⁹	50.65	4.95 × 10 ⁹	50.41	2.21 × 10 ⁹	24.67	6.85 × 10 ⁹	74.62
江苏	-1.21 × 10 ¹⁰	-50.65	-5.01 × 10 ⁹	-20.77	-1.42 × 10 ¹⁰	-58.12	-3.97 × 10 ⁹	-18.87	-5.97 × 10 ⁹	-27.31	-1.23 × 10 ¹⁰	-57.22
浙江	-3.09 × 10 ⁹	-42.28	-3.92 × 10 ⁹	-55.08	-4.50 × 10 ⁹	-66.42	-3.54 × 10 ⁹	-62.23	-4.06 × 10 ⁹	-70.06	-3.77 × 10 ⁹	-67.16
安徽	-2.65 × 10 ⁹	-18.68	-3.37 × 10 ⁹	-24.01	-3.68 × 10 ⁹	-27.06	-2.82 × 10 ⁹	-21.91	-4.63 × 10 ⁹	-35.17	-2.10 × 10 ⁹	-18.59
福建	-3.43 × 10 ⁹	-62.12	-3.40 × 10 ⁹	-64.13	-3.59 × 10 ⁹	-67.04	-3.15 × 10 ⁹	-65.27	-3.51 × 10 ⁹	-71.15	-3.76 × 10 ⁹	-71.97
山东	5.5 × 10 ⁷	0.50										
河南	2.55 × 10 ⁹	22.82	4.17 × 10 ⁹	41.39	6.19 × 10 ⁹	62.83	5.68 × 10 ⁹	53.84	2.27 × 10 ⁹	18.96	6.13 × 10 ⁹	66.29
湖北	-3.84 × 10 ⁹	-32.74	-2.62 × 10 ⁹	-25.57	-2.89 × 10 ⁹	-28.36	-5.51 × 10 ⁹	-43.17	-5.53 × 10 ⁹	-46.77	-5.01 × 10 ⁹	-42.62
湖南									-3.37 × 10 ⁹	-20.19	-5.03 × 10 ⁸	-2.86
广东	-1.56 × 10 ¹⁰	-83.93	-1.47 × 10 ¹⁰	-78.40	-1.47 × 10 ¹⁰	-79.28	-1.56 × 10 ¹⁰	-80.42	-1.32 × 10 ¹⁰	-81.40	-1.30 × 10 ¹⁰	-80.08
广西	-1.44 × 10 ¹⁰	-79.95	-1.34 × 10 ¹⁰	-75.23	-1.33 × 10 ¹⁰	-75.35	-1.24 × 10 ¹⁰	-73.88	-1.40 × 10 ¹⁰	-78.70	-1.39 × 10 ¹⁰	-77.89
海南	-2.03 × 10 ⁹	-77.35	-2.04 × 10 ⁹	-79.55	-2.04 × 10 ⁹	-80.12	-2.04 × 10 ⁹	-79.57	-2.14 × 10 ⁹	-83.29	-2.28 × 10 ⁹	-84.25
重庆	1.34 × 10 ⁹	62.30	1.30 × 10 ⁹	56.80							2.14 × 10 ⁸	8.92
四川					-1.55 × 10 ⁹	-13.34						
贵州					-1.51 × 10 ⁹	-35.67						
云南	-4.60 × 10 ⁹	-57.56	-4.20 × 10 ⁹	-54.03	-2.70 × 10 ⁹	-37.54	-2.85 × 10 ⁹	-38.53	-2.29 × 10 ⁹	-36.40	-2.27 × 10 ⁹	-35.20
陕西	-5.59 × 10 ⁸	-12.02										
甘肃	-2.07 × 10 ⁹	-27.48			-3.38 × 10 ⁹	-60.32	-3.12 × 10 ⁹	-54.94	-3.24 × 10 ⁹	-58.07	-3.25 × 10 ⁹	-51.83
青海	-9.51 × 10 ⁸	-77.94	-9.27 × 10 ⁸	-79.26								

表 5 粮食生产绿水投影分析

Tab.5 Projection analysis of green water in grain production

DMU	2009 年		2010 年		2011 年		2012 年		2013 年		2014 年	
	调整量/m ³	调整率/%	调整量/m ³	调整率/%	调整量/m ³	调整率/%	调整量/m ³	调整率/%	调整量/m ³	调整率/%	调整量/m ³	调整率/%
北京	4.30 × 10 ⁷	7.22			8.60 × 10 ⁷	16.27						
天津					-5.70 × 10 ⁷	-6.27	-4.40 × 10 ⁷	-3.74				
河北					-1.07 × 10 ⁸	-0.67						
山西					-1.52 × 10 ⁹	-20.43					8.43 × 10 ⁸	16.36
内蒙古	4.60 × 10 ⁷	0.45	2.25 × 10 ⁹	20.40								
辽宁	-7.27 × 10 ⁸	-6.80	-2.43 × 10 ⁹	-15.23	-2.53 × 10 ⁹	-20.04	-2.55 × 10 ⁹	-15.60	-8.14 × 10 ⁸	-5.25	-1.42 × 10 ⁹	-13.56
吉林	3.86 × 10 ⁹	24.28	2.73 × 10 ⁹	12.51	5.14 × 10 ⁹	31.88	1.57 × 10 ⁹	7.09	8.48 × 10 ⁸	36.26	3.98 × 10 ⁹	21.58
上海			1.03 × 10 ⁸	15.20			2.10 × 10 ⁷	3.52				
江苏	-1.19 × 10 ⁹	-5.51			-2.25 × 10 ⁹	-11.81					-5.10 × 10 ⁹	-21.68
浙江					-2.17 × 10 ⁸	-5.48	-3.30 × 10 ⁸	-6.40	-2.05 × 10 ⁸	-4.31	-1.28 × 10 ⁹	-25.63
安徽	-5.59 × 10 ⁹	-21.88	-6.85 × 10 ⁸	-2.69	-8.74 × 10 ⁹	-34.93	-5.28 × 10 ⁹	-18.92	-7.26 × 10 ⁹	-24.54	-1.39 × 10 ¹⁰	-43.00
福建	-1.88 × 10 ⁸	-4.95	-2.58 × 10 ⁸	-5.52	-8.53 × 10 ⁸	-22.74	-5.60 × 10 ⁸	-12.93	-9.97 × 10 ⁸	-21.12	-1.60 × 10 ⁹	-35.34
江西	5.14 × 10 ⁸	5.01							4.50 × 10 ⁸	3.84		
山东	4.06 × 10 ⁹	18.33	4.92 × 10 ⁹	22.57			4.76 × 10 ⁹	21.78	2.66 × 10 ⁹	12.04	2.34 × 10 ⁹	11.81
河南	1.18 × 10 ¹⁰	36.21	1.24 × 10 ¹⁰	40.00			5.07 × 10 ⁹	16.48	7.90 × 10 ⁹	28.61		
湖北	-1.57 × 10 ⁹	-9.03	-1.07 × 10 ⁹	-5.58	-3.24 × 10 ⁹	-21.27	-9.97 × 10 ⁸	-5.77	-1.72 × 10 ⁹	-9.44	-6.15 × 10 ⁹	-31.24
湖南	2.92 × 10 ⁹	20.13										
广东	-1.06 × 10 ⁹	-8.74	-3.16 × 10 ⁹	-25.11	-5.08 × 10 ⁹	-44.62	-4.07 × 10 ⁹	-32.26	-6.29 × 10 ⁹	-44.32	-5.44 × 10 ⁹	-45.57
广西	-1.63 × 10 ⁹	-10.86			-3.63 × 10 ⁹	-33.69	-2.61 × 10 ⁹	-20.93	-3.84 × 10 ⁹	-27.90	-5.57 × 10 ⁹	-41.24
海南	-8.75 × 10 ⁸	-46.06	-5.02 × 10 ⁸	-29.21	-1.07 × 10 ⁹	-56.42	-7.95 × 10 ⁸	-40.34	-9.06 × 10 ⁸	-44.61	-6.04 × 10 ⁸	-41.34
四川	1.91 × 10 ⁹	9.48	2.29 × 10 ⁹	11.20	-7.03 × 10 ⁸	-3.59						
贵州					-5.94 × 10 ⁹	-55.90						
云南	-1.01 × 10 ¹⁰	-44.54	-1.02 × 10 ¹⁰	-44.49	-1.03 × 10 ¹⁰	-58.30	-6.74 × 10 ⁹	-39.73	-1.03 × 10 ¹⁰	-49.59	-9.77 × 10 ⁹	-53.84
甘肃					-2.24 × 10 ⁹	-38.03	-1.61 × 10 ⁹	-22.21	-1.13 × 10 ⁹	-16.34	-9.70 × 10 ⁸	-15.75
青海	-2.86 × 10 ⁸	-37.19	-1.03 × 10 ⁸	-14.13								
宁夏					1.27 × 10 ⁸	8.90			3.85 × 10 ⁸	21.64		

2009—2014年的粮食生产绿水投入量均存在不足现象。投入不足最多的省级行政区是河南省,其次是吉林省,6年平均投入不足量为 $9.28 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $4.29 \times 10^9 \text{ m}^3$,粮食生产绿水平均投入不足30.33%和22.27%。绿水是作物生长过程中有效利用的降水资源,其利用率不高可能与农产品的单产水平不一致或农作物种类不同导致的经济价值差异有关^[2]。

综合粮食生产蓝水和粮食生产绿水的投影结果可知,吉林省面临着较为严重的粮食生产用水短缺问题,6年平均粮食生产蓝水和粮食生产绿水短缺量分别为 $3.88 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $4.29 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。我国不同省级行政区的粮食生产用水投入冗余问题多于粮食生产用水投入不足问题,说明我国的粮食生产用水浪费情况较为普遍,粗放型的生产要素投入方式没有得到有效的改善,加剧了我国粮食生产用水危机。粮食生产蓝水和粮食生产绿水投入冗余或不足的相似度高,没能达到有效降水对灌溉水的补给或者灌溉水对有效降水的补充效果。

3 讨论

本文的研究结果表明,我国粮食生产用水效率低,不同地区的粮食生产用水效率差异加剧,不利于我国粮食产业的可持续发展和水资源的高效利用。在水资源有限的现实情况下,用最少的水资源投入,实现粮食产量的最大化,这是保障我国粮食安全和水资源安全的发展思路。文献[2, 11, 13, 18, 31 - 32]从理论分析和实证分析角度对我国粮食生产用水问题进行了研究,对比发现本研究与已有研究存在以下不同。

(1)研究角度不同:本文是在粮食生产直接要素的基础上引入粮食生产蓝水和粮食生产绿水,从投入产出效率的角度对我国粮食生产用水问题进行评价,发现粮食生产过程中水资源的利用问题,针对性地提出提高粮食生产用水效率的策略,保障粮食安全。李保国等^[18]是从粮食安全水资源量的角度,计算主要粮食作物的水资源安全红线来讨论粮食安全问题。李静等^[13]从资源约束的角度研究粮食生产用水效率问题,认为长期偏低的水价并未真正反映水资源的经济价值,应根据产粮区粮食生产与环

境特点制定适宜的水价机制来提高用水效率。

(2)研究范围不同:本文以我国31个省级行政区2009—2014年粮食生产用水效率作为研究目标,选择小麦、玉米、水稻和大豆4类主要粮食作物作为研究对象,更全面细致地评价分析了我国粮食生产用水效率的现状,是比较全面的一种研究思路。已有的研究中对我国农业用水效率或者灌区的灌溉用水效率研究较多,用农业指标替代粮食指标较多,将粮食剥离大农业口径的研究较少,本研究是对全国口径的广义粮食生产用水效率研究的补充。

由此可以得出,与已有的研究文献相比,本文对我国的粮食生产用水效率问题进行研究,构建粮食生产用水效率评价指标体系切实可行,得出的结论与实际情况相符,且通过投影分析对粮食生产投入要素进行针对性的调整,以保障粮食生产用水效率的提高,促进粮食产业的健康发展。未来对粮食生产用水效率的研究可以更加细化,从不同作物的角度进行研究,提出更加具体的粮食生产用水效率提高策略。

4 结论

(1)我国粮食生产用水效率差异较大,用水效率整体不高。粮食生产用水效率较低的省级行政区存在生产资料浪费、生产要素过度投入的情况,粮食生产用水效率较高的省级行政区存在一定程度的生产资料投入不足。

(2)我国粮食生产灌溉用水过度投入情况严重,造成了大量的水资源浪费,加剧了粮食作物生产过程中水资源的供需矛盾。我国水土资源时空差异大,匹配度较低。有效降水受自然因素影响较大,人为主观不可控。因此在粮食生产用水过程中,灌溉用水的调节作用尤为重要,但现阶段我国的灌溉用水没有实现其自身的调节作用。

(3)我国粮食生产用水效率与粮食生产效率的发展趋势一致性较高,水资源在粮食生产过程中的地位较高,影响程度较深。粮食生产效率的提高与粮食生产用水效率的提高息息相关,实现粮食生产用水要素最优配置,提升粮食生产用水效率,促进粮食产业提质增效,是未来实现粮食产业转型和发展的重中之重。

参 考 文 献

- [1] 李颖明. 粮食主产区农业水资源可持续利用分析[J]. 中国农村经济, 2007(9): 45 - 52.
 - [2] 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于DEA的灌区生产效率分析——以江苏省为例[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2): 173 - 178.
- CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Analysis of production efficiency of irrigation districts based on DEA method: take Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2): 173 - 178. (in

Chinese)

- [3] 付强,刘巍,刘东,等. 黑龙江省灌溉用水效率指标体系空间格局研究[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(12):127-132.
FU Qiang,LIU Wei,LIU Dong, et al. Spatial distribution of irrigation water use efficiency index system in Heilongjiang Province [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(12):127-132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151218&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.018. (in Chinese)
- [4] 操信春,吴普特,王玉宝,等. 中国灌区水分生产率及其时空差异分析[J]. 农业工程学报,2012,28(13):1-7.
CAO Xinchun,WU Pute,WANG Yubao, et al. Analysis on temporal and spatial differences of water productivity in irrigation districts in China[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(13):1-7. (in Chinese)
- [5] 李绍飞. 改进的模糊物元模型在灌区农业用水效率评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(11):175-181.
LI Shaofei. Application of improved fuzzy matter-element model to evaluate the irrigation water use efficiency[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2011,25(11):175-181. (in Chinese)
- [6] 李浩鑫,邵东国,何思聪,等. 基于循环修正的灌溉用水效率综合评价方法[J]. 农业工程学报,2014,30(5):65-72.
LI Haoxin,SHAO Dongguo,HE Sicong, et al. Comprehensive evaluation method for irrigation-water use efficiency based on circulation-correction[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(5):65-72. (in Chinese)
- [7] 刘路广,崔远来,王建鹏. 基于水量平衡的农业节水潜力计算新方法[J]. 水科学进展,2011,22(5):696-702.
LIU Luguang,CUI Yuanlai,WANG Jianpeng. New calculation method for water-saving potential in agriculture based on water balance principle[J]. Advances in Water Science,2011,22(5):696-702. (in Chinese)
- [8] 佟金萍,马剑锋,王圣,等. 长江流域农业用水效率研究:基于超效率 DEA 和 Tobit 模型[J]. 长江流域资源与环境,2015,24(4):603-608.
TONG Jinping,MA Jianfeng,WANG Sheng, et al. Research on agricultural water use efficiency in Yangtze River Basin based on super-efficiency DEA and Tobit model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(4):603-608. (in Chinese)
- [9] 王学渊. 基于 DEA 和 SFA 方法的中国省区灌溉用水效率比较研究[J]. 统计与决策,2010(8):44-47.
- [10] 王玉宝,吴普特,孙世坤,等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):208-215.
WANG Yubao,WU Pute,SUN Shikun, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(10):208-215. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151027&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.027. (in Chinese)
- [11] 王玉宝,柴成亮,张鹏,等. 气候变化条件下旱作玉米用水效率与单产变化趋势分析[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(8):217-225.
WANG Yubao,CHAI Chengliang,ZHANG Peng, et al. Trend analysis of water use efficiency and yield of dryland maize under climate change[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):217-225. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180825&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.08.025. (in Chinese)
- [12] 刘玉海,武鹏. 能源消耗、二氧化碳排放与 APEC 地区经济增长——基于 SBM - Undesirable 和 Meta - frontier 模型的实证研究[J]. 经济评论,2011(6):109-120,129.
LIU Yuhai,WU Peng. Analysis on the difference of energy consumption spillovers on economic growth: an empirical test taking consumption per capita as a threshold variable[J]. Economic Review,2011(6):109-120,129. (in Chinese)
- [13] 李静,马潇璨. 资源与环境约束下的产粮区粮食生产用水效率与影响因素研究[J]. 农业现代化研究,2015,36(2):252-258.
LI Jing, MA Xiaocan. Study on water utilization efficiency and its influencing factors of grain production under the constraints of resource and environment in grain-producing regions[J]. Research of Agricultural Modernization,2015,36(2):252-258. (in Chinese)
- [14] ANDERSEN P,PETERSEN N C. A procedure for ranking units in data envelopment analysis[J]. Management Science, 1993,39(10):1261-1264.
- [15] TONE K. A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2001,130(3):498-509.
- [16] 曹志宏,梁涛涛,郝晋珉. 基于超效率的黄淮海粮食生产效率分析[J]. 农业系统科学与综合研究,2010,26(1):6-11.
CAO Zhihong,LIANG Liutao,HAO Jinmin. The analysis of food production efficiency of Huang-Huai-Hai region based on the super-efficiency[J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture,2010,26(1):6-11. (in Chinese)
- [17] 孙巍. 生产资源配置效率——生产前沿面理论及其应用[M]. 北京:社会科学文献出版社,2000.
- [18] 李保国,黄峰. 1998—2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展,2010,21(4):575-583.
LI Baoguo,HUANG Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science,2010,21(4):575-583. (in Chinese)

- [19] FALKENMARK M, ROCKSTROM J. The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management[J]. *Journal of Water Resources Planning & Management*, 2006, 132(3):129–132.
- [20] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2010 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [21] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2011 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
- [22] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2012 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国农业出版社,2014.
- [23] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2013 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国农业出版社,2015.
- [24] 吴普特,王玉宝,赵西宁. 2014 中国粮食生产水足迹与区域虚拟水流动报告[M]. 北京:中国农业出版社,2016.
- [25] 闵锐,李谷成. 环境约束条件下的中国粮食全要素生产率增长与分解——基于省域面板数据与序列 Malmquist-Luenberger 指数的观察[J]. *经济评论*,2012(5):34–42.
MIN Rui,LI Gucheng. A study on growth and decomposition of China's grain TFP growth under environmental constrains: empirical analysis based on provincial panel data and sequential Malmquist-Luenberger index[J]. *Economic Review*,2012(5):34–42. (in Chinese)
- [26] 李静,孙有珍. 资源与环境双重约束下的粮食生产用水效率研究[J]. *水资源保护*,2015,31(6):67–75.
LI Jing,SUN Youzhen. Study on efficiency of agriculture water utilization under dual constraints of resource and environment [J]. *Water Resources Protection*,2015,31(6):67–75. (in Chinese)
- [27] 马文杰. 中国粮食综合生产能力研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [28] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等. 中国农业全要素用水效率及其影响因素分析[J]. *经济问题*,2014(6):101–106.
TONG Jinping,MA Jianfeng,WANG Huimin,et al. Research on agricultural total-factor water use efficiency and its influencing factors in China[J]. *On Economic Problems*,2014(6):101–106. (in Chinese)
- [29] 佟金萍,马剑锋,王慧敏,等. 农业用水效率与技术进步:基于中国农业面板数据的实证研究[J]. *资源科学*,2014, 36(9):1765–1772.
TONG Jinping,MA Jianfeng,WANG Huimin,et al. Agricultural water use efficiency and technical progress in China based on agricultural panel data[J]. *Resources Science*,2014,36(9):1765–1772. (in Chinese)
- [30] 魏权龄. 数据包络分析(DEA) [M]. 北京:科学出版社,2006.
- [31] 赵连阁,王学渊. 农户灌溉用水的效率差异——基于甘肃、内蒙古两个典型灌区实地调查的比较分析[J]. *农业经济问题*,2010,31(3):71–78,111.
- [32] 操信春,杨陈玉,何鑫,等. 中国灌溉水资源利用效率的空间差异分析[J]. *中国农村水利水电*,2016(8):128–132.
CAO Xinchun, YANG Chenyu, HE Xin, et al. Assessing the spatial variation of irrigation water use efficiency in grain production of China[J]. *China Rural Water and Hydropower*,2016(8):128–132. (in Chinese)

(上接第 248 页)

- [17] JAY S, RABATEL G, HADOUX X, et al. In-field crop row phenotyping from 3D modeling performed using structure from motion[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 110: 70–77.
- [18] 苏显渝,张启灿,陈文静. 结构光三维成像技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(2):1–10.
SU Xianyu, ZHANG Qican, CHEN Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2):1–10. (in Chinese)
- [19] HAN X F, JIN J S, WANG M J, et al. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2017, 57: 103–112.
- [20] LANCASTER P, SALKAUSKAS K. Surfaces generated by moving least squares methods[J]. *Mathematics of Computation*, 1981, 37(155): 141–158.
- [21] LIM E H, SUTER D. 3D terrestrial LiDAR classifications with super-voxels and multi-scale conditional random fields[J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(10): 701–710.
- [22] RUSU R B. Semantic 3D object maps for everyday manipulation in human living environments[J]. *KI-Künstliche Intelligenz*, 2010, 24(4): 345–348.
- [23] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography[J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381–395.
- [24] MARTON Z C, RUSU R B, BEETZ M. On fast surface reconstruction methods for large and noisy point clouds[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2009:3218–3223.
- [25] YANG M Y, FÖRSTNER W. Plane detection in point cloud data[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Control Guidance*, Bonn. 2010: 95–104.
- [26] CHAUDHARY P, CHAUDHARI A K, CHEERAN A N, et al. Color transform based approach for disease spot detection on plant leaf[J]. *International Journal of Computer Science and Telecommunications*, 2012, 3(6): 65–70.